

9Ni 钢超窄间隙光纤激光焊接接头组织及性能

田书强^{1,2}, 李铸国^{1,2}, 华学明^{1,2}

¹上海交通大学上海市激光制造与材料改性重点实验室, 上海 200240;

²高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240

摘要 采用 YLS-10000 光纤激光器和 ERNiMo-8 焊丝, 对液化天然气船液罐用 9Ni 钢进行了超窄间隙激光焊接, 研究了接头组织和性能。结果表明, 优化焊接参数可以得到侧壁熔合良好的超窄间隙接头。焊缝组织主要为奥氏体, 两侧结晶形态为柱状晶, 中心为等轴晶。热影响区分为明显的粗晶区和细晶区, 组织均为马氏体和少量残余奥氏体, 硬度均值约为 340 HV, 远高于母材均值(230 HV)和焊缝均值(200 HV)。拉伸试样均断于焊缝, 接头抗拉强度略低于母材的。随着与焊缝中心距离的增大, 接头的低温冲击功增大, 且均值都在 70 J 以上。断口形貌均为细小的韧窝, 接头为韧性断裂。

关键词 激光技术; 光纤激光器; 超窄间隙焊接; 低温性能; 9Ni 钢; 镍基合金

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.041408

Microstructure and Property of 9Ni Steel Joint by Ultra-Narrow-Gap Fiber Laser Welding

Tian Shuqiang^{1,2}, Li Zhuguo^{1,2}, Hua Xueming^{1,2}

¹Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

²Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai 200240, China

Abstract By using YLS-10000 fiber lasers and ERNiMo-8 filler wire, the ultra-narrow-gap laser welding of 9Ni steel for liquid container of liquefied natural gas (LNG) vessels is conducted and the microstructure and property of the welded joint are studied. The results show that, the ultra-narrow-gap welded joint with good fusion sidewalls can be obtained by optimizing weld parameters. The microstructure of weld is austenite, and crystallization morphology on two sides is columnar crystal, while that at center is equiaxed crystal. The heat affected zone (HAZ) is clearly divided into coarse grain zone and fine grain zone, and both of their microstructures are martensite and a small amount of residual austenite, where the average hardness is about 340 HV, much higher than that of the base metal (230 HV) and that of the weld (200 HV). Fractures occur on welds of tensile test specimens, and the tensile strength of the joint is slightly lower than that of the base metal. The low-temperature impact energy of the joint increases with its distance from the weld center increase, with an average value of above 70 J. The fracture morphology is always tiny dimple and the fracture of the joint is ductile.

Key words laser technique; fiber lasers; ultra-narrow-gap welding; low-temperature property; 9Ni steel; nickel-base alloy

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 180.5810; 350.3390

1 引言

9Ni 钢是一种低温用低碳马氏体钢, 具有优良的低温韧性及较高的强度, 广泛用于液化天然气(LNG)船

收稿日期: 2016-11-21; **收到修改稿日期:** 2016-12-23

基金项目: 工业和信息化部新型液化天然气船液货围护系统预先研究项目

作者简介: 田书强(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事 9Ni 钢激光焊接方面的研究。E-mail: sjtusqtian@foxmail.com

导师简介: 李铸国(1972—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事激光焊接与表面工程方面的研究。

E-mail: lizg@sjtu.edu.cn(通信联系人)

液罐设备的制造^[1]。焊接是大型低温液罐制造过程中的关键技术,LNG 船液罐通常服役于 $-163\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的超低温环境中,9Ni 钢焊接接头的低温韧性必须达到较高水平。9Ni 钢在焊接中容易出现的主要问题包括热裂纹、冷裂纹、电弧磁偏吹以及低温韧性的下降,因此必须严格控制焊接热输入和层间温度,并通过镍基合金焊丝调节焊缝成分,以改善接头的低温力学性能^[2-3]。

目前,9Ni 钢的焊接研究主要围绕手工电弧焊(SMAW)、埋弧焊(SAW)、药芯焊丝气体保护焊(FCAW)、钨极氩弧焊(TIG)等焊接方法展开,很多学者对相关工艺以及焊接接头组织和性能进行了对比分析^[4-6]。然而,采用传统的弧焊焊接方法焊接 9Ni 钢厚板时仍存在诸多缺点:1) 熔敷速率慢,单道焊接熔深小,焊接效率较低;2) 坡口尺寸大,焊丝消耗量大,焊接成本较高;3) 弧焊较大的热输入会产生较大的焊接变形和较高的残余应力;4) 9Ni 钢自身的磁性会使焊接过程产生电弧磁偏吹,影响焊接稳定性。Kim 等^[7]采用电子束焊接 23 mm 厚 9Ni 钢,并研究了镍含量对接头低温韧性的影响规律。但电子束焊接须在真空环境下进行,这严重限制了其在工业生产中的应用。超窄间隙激光焊接技术融合了激光焊接和超窄间隙焊接的优点,在提高焊接效率的同时,可以极大地节约焊材,降低焊接成本。作为一种先进的中、厚板焊接技术,超窄间隙激光焊接越来越受到研究人员的重视。余阳春等^[8]实现了 17 mm 厚低碳钢的窄间隙激光焊接,并对窄间隙坡口设计和焊接工艺的影响因素进行了研究。张国伟等^[9-11]先后实现了 25 mm 厚 5083 铝合金、50 mm 厚转子钢和 60 mm 厚 304 不锈钢的超窄间隙激光焊接,对接头的组织和性能进行了分析。超窄间隙激光焊接技术在 LNG 大型储罐设备制造中具有极大的应用潜力。同时,不同于电弧加热,激光加热无需外加磁场,避免了 9Ni 钢焊接过程中的电弧磁偏吹问题。

但是,目前关于 9Ni 钢激光焊接的研究较少,超窄间隙填丝焊接头的组织和性能研究也鲜有报道。本文采用德国 IPG 公司生产的 YLS-10000 光纤激光器和日本神户钢铁公司生产的新型 ERNiMo-8 镍基合金焊丝,对南京钢铁股份有限公司研发的 16 mm 厚 9Ni 钢进行了超窄间隙激光填丝焊接试验,得到了优化的焊接工艺参数,对接头组织和力学性能进行了分析、测试,为后续 9Ni 钢的先进焊接工艺的研究和生产应用提供了参考。

2 试验条件及方法

本试验母材采用南京钢铁股份有限公司生产的 16 mm 厚 LNG 船液罐用 9Ni 钢,焊丝采用日本神户钢铁公司生产的直径为 1.2 mm 的新型 ERNiMo-8 镍基合金焊丝,母材和焊丝的化学成分如表 1 所示。母材的屈服强度和抗拉强度分别是 669 MPa 和 707 MPa,焊丝的屈服强度和抗拉强度分别是 460 MPa 和 730 MPa。母材出厂热处理状态为淬火-回火(Q-T),组织为回火马氏体和少量残余奥氏体,如图 1(a)所示。焊丝的组织为奥氏体,富含元素 Mo 以及少量 Cr 和 W,如图 1(b)所示。

表 1 9Ni 钢母材和 ERNiMo-8 焊丝的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of 9Ni steel base metal and ERNiMo-8 filler wire (mass fraction, %)

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Al	Cu	Cr	Mo	W	Fe
Base metal	0.04	0.19	0.62	0.04	0.01	9.12	0.32	0.02	0.04	0.01	-	Bal.
Filler wire	0.02	0.03	0.03	0.002	0.001	70.4	-	-	2.0	19.0	3.0	5.5

试验采用的 YLS-10000 光纤激光器,最大输出功率为 10 kW,光束参数积为 $12\text{ }\mu\text{m}\cdot\text{rad}$,焦距为

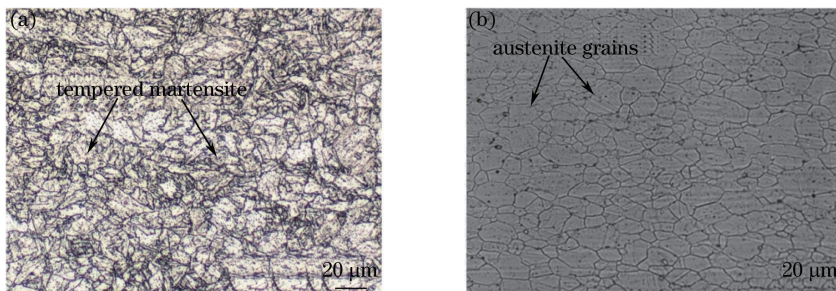


图 1 (a) 9Ni 钢母材和(b) ERNiMo-8 焊丝的显微组织

Fig. 1 Microstructures of (a) 9Ni steel base metal and (b) ERNiMo-8 filler wire

300 mm, 聚焦状态下光斑直径为 0.72 mm。焊接采用 KUKA 公司的 KR 60HA 机器人, 负载为 588 N, 重复定位精度为 $-0.05 \sim 0.05$ mm。送丝设备采用 Fronius 公司生产的 TPS500 气保护焊机的送丝系统。焊接过程中同时采用后置侧吹保护和背面保护两种方式来抑制等离子体, 避免焊接熔池的氧化, 保护气体为纯氩气。激光束、焊丝和保护气的位置关系如图 2 所示。

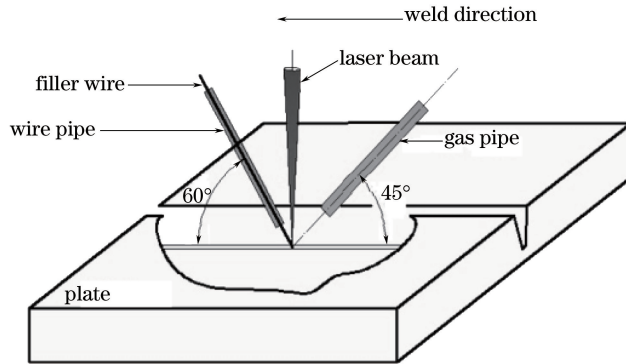


图 2 超窄间隙激光填丝焊接布置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of arrangement of ultra-narrow-gap laser welding with filler wire

超窄间隙激光焊接通常采用 Y 型坡口, 钝边采用激光自熔焊连接, 钝边高度由激光器的最大输出功率决定, 即在激光功率允许的情况下采用尽可能大的钝边, 以减少填丝道数, 提高焊接效率。但 9Ni 钢焊接需要通过镍基合金焊丝来改善焊缝的低温韧性, 如果采用较大钝边进行激光自熔焊, 接头自熔焊区域的低温韧性难以达到工程应用标准, 因此 9Ni 钢超窄间隙激光焊接坡口设计不宜遵循常规设计原则。

本试验采用图 3 所示的坡口, 钝边高度和底部宽度均为 2 mm, 坡口角度为 6° , 以减小焊接过程中形变引起的坡口收缩对后续焊道的影响。与 9Ni 钢传统弧焊工艺采用的 60° V 形坡口相比, 超窄间隙激光焊接坡口截面积仅为其 1/4 左右。焊接由 1 道激光自熔焊和 5 道激光填丝焊组成, 优化后的焊接参数如表 2 所示。焊接过程中严格控制层间温度, 待上道焊缝充分冷却并清理后再进行后续焊接。

表 2 焊接参数

Table 2 Weld parameters

Number of weld layers	Laser power /kW	Weld speed / (m/min)	Wire feed rate / (m/min)	Defocusing amount /mm	Flow rate of side shielding gas / (L/min)
1	3.0	2.00	0	0	25
2-5	3.0	0.42	2.0	+25	25
6	3.5	0.42	2.5	+25	25

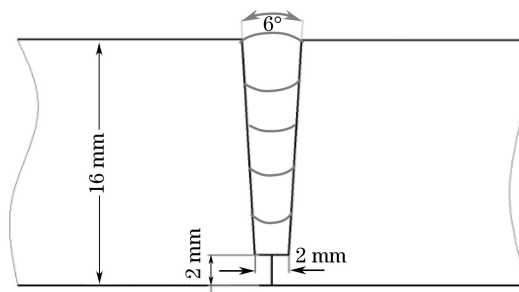


图 3 9Ni 钢超窄间隙激光焊接坡口尺寸及焊道分布

Fig. 3 Groove geometry and weld bead distribution in ultra-narrow-gap laser welding of 9Ni steel

选取 X 射线检测合格的焊接试样进行线切割取样、镶嵌、研磨、抛光并腐蚀, 然后分别利用金相显微镜和扫描电子显微镜对接头各区进行组织观察和元素成分分析。基于母材和焊缝显著的耐腐蚀性能差异, 母材和热影响区用体积分数为 4% 的硝酸酒精进行腐蚀, 焊缝区用王水 (浓盐酸和浓硝酸体积比为 3:1) 进行腐蚀。

采用德国 Zwick Roell 公司生产的 ZH μ HD 型全自动硬度计对接头上部、中部和底部三个位置的显微

硬度进行测试,打点位置分别距焊缝上表面 2,8,14 mm,施加载荷为 4.9 N,加载时间为 15 s。分别从焊缝上部、中部和底部切取拉伸试样,用德国 Zwick Roell 公司生产的多功能材料试验机在室温下进行拉伸试验。从接头中部截取多个标准冲击试样(10 mm×10 mm×55 mm),分成 6 组在距离焊缝中心不同位置开 V 型缺口后,将其放入装有液氮的低温箱内保存 0.5 h 左右,温度降至 -196 °C 后进行夏比冲击试验,用扫描电镜观察断口形貌。

3 试验结果及分析

3.1 焊缝形貌

16 mm 厚 9Ni 钢超窄间隙激光焊接接头上下表面形貌分别如图 4(a)、(b)所示,焊接接头表面成形良好,没有明显的外观缺陷,焊后几乎没有发生形变。接头用王水和硝酸酒精腐蚀后,其截面形貌分别如图 4(c)、(d)所示,几乎无气孔、侧壁未熔合等缺陷。焊缝上下宽度相差不大,约为 3.5 mm;接头中部热影响区宽度为 1.8 mm 左右;盖面焊道和底部焊道热影响区略宽,约为 2.0 mm,这是由于盖面焊道增强了激光功率,热输入比其他焊道的略大,底部焊道则先后受到了激光自熔焊和首道填丝焊的热输入。可以看出,接头由 5 道填丝组成,单道填充高度约为 3 mm。

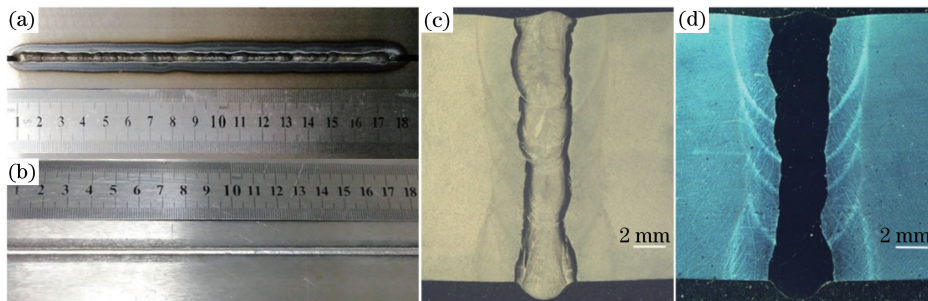


图 4 接头宏观形貌。(a)上表面;(b)下表面;(c)截面(王水腐蚀);(d)截面(体积分数为 4%的硝酸酒精腐蚀)

Fig. 4 Macro-morphology of welded joint. (a) Upper surface; (b) lower surface; (c) cross section (corrosion by aqua regia); (d) cross section (corrosion by nitric acid alcohol solution with volume fraction of 4%)

3.2 接头组织和成分

焊接接头各区域的显微组织如图 5 所示。焊缝组织主要为 γ 固溶体,中心结晶形态为细小的等轴晶,如图 5(a)所示;两侧为柱状树枝晶,如图 5(b)所示,枝晶宽度约为 $8.0 \mu\text{m}$ 。枝晶生长具有明显的择优取向性,沿最大温度梯度垂直于熔合线向焊缝中心生长,如图 5(c)所示。这种结晶形貌的出现主要是由于激光焊接过程冷却速率较快,在两侧柱状晶还未长到焊缝中心时,中心温度已经下降到结晶温度以下,柱状晶的生长方向性减弱,晶核可以自由生长,进而形成等轴晶。

焊缝和热影响区(HAZ)存在清晰的熔合线边界,边界处存在一个宽约 $25 \mu\text{m}$ 的部分熔化区,如图 5(d)所示,组织形态呈带状。该区域的形成主要是由于激光焊接冷却速率快,且镍基合金焊丝的熔点比母材的低,因此黏度较大,进而致使流动性差,引起母材和焊缝金属熔合不充分。热影响区靠近焊缝一侧为粗晶区,组织为粗大的板条马氏体,如图 5(e)所示,主要是由母材中的回火马氏体在高温下奥氏体化后快速冷却转变而来;靠近母材一侧为细晶区,晶粒较为细小,组织与母材的相似,同样为回火马氏体及少量残余奥氏体,如图 5(f)所示。

由于母材和焊丝成分的显著差异,熔合线两侧的元素成分会有较大变化。在扫描电镜下由热影响区向焊缝方向进行线扫,扫描长度约为 $110 \mu\text{m}$,各主要元素的含量变化如图 6 所示。可以看出,元素过渡区宽度约为 $25 \mu\text{m}$,与图 5(d)组织中的部分熔化区宽度一致。5 种测试元素中,只有母材中富含的 Fe 元素呈下降趋势,经过渡区域,计数率从热影响区的 9500 左右下降至焊缝中的 5000 左右,下降幅度接近 50%。而焊丝中富含的 Ni、Mo 两种元素含量则大幅提升,焊缝中的含量约为热影响区的 4 倍,Mo 元素能够增强固溶体中原子之间的结合力,阻止奥氏体晶粒长大,从而提高焊缝的低温韧性和耐腐蚀性能。焊丝中的 Cr、W 两种少量元素在焊缝中也有不同程度的增加,Cr 元素能够提高焊缝的抗氧化能力,W 元素则可以抑制 Mo 元素的偏析。正是由于过渡区的元素变化,部分熔化区内的组织从马氏体向马氏体+奥氏体转变^[1]。

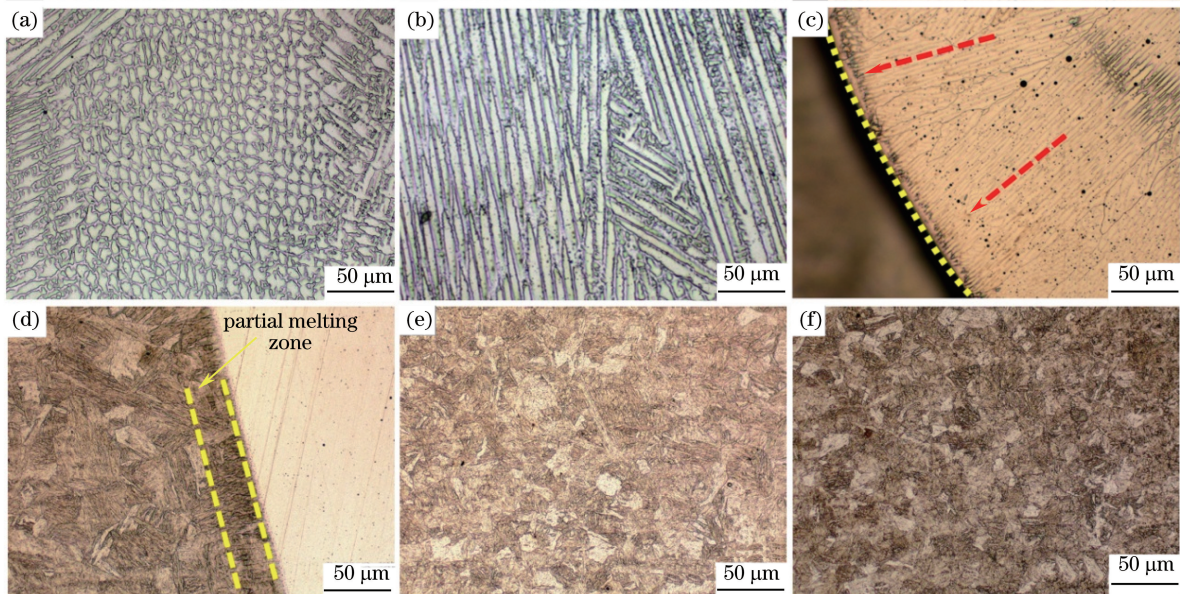


图 5 焊接接头显微组织。(a)焊缝中心;(b)焊缝侧;(c)熔合线近焊缝侧;(d)熔合线近热影响区侧;(e)热影响区中的粗晶区;(f)热影响区中的细晶区

Fig. 5 Microstructures of welded joint. (a) Welded center; (b) weld side; (c) fusion line near weld; (d) fusion line near HAZ; (e) coarse grain zone in HAZ; (f) fine grain zone in HAZ

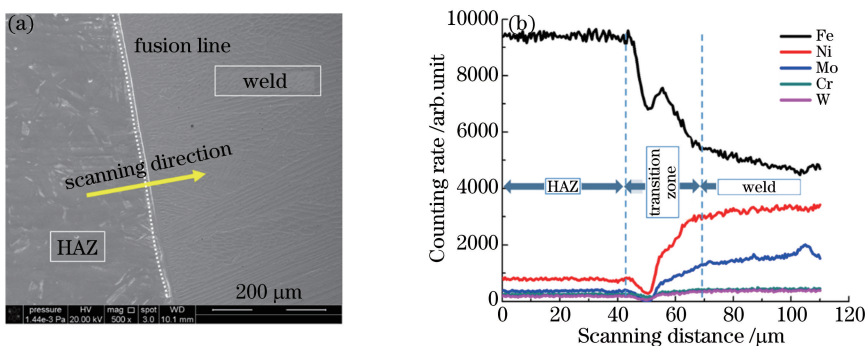


图 6 焊缝和热影响区界面附近的元素分布。(a)线扫描方向;(b)线扫描结果

Fig. 6 Element distributions near the interface between weld and HAZ. (a) Scanning direction; (b) scanning result

3.3 接头力学性能

3.3.1 显微硬度和拉伸性能

焊接接头上部、中部和底部三个不同位置的显微硬度测试结果如图 7 所示。由图可以看到,接头热影响区部位的平均硬度约为 340 HV,母材部位的约为 230 HV,焊缝区部位的约为 200 HV。热影响区部位的组

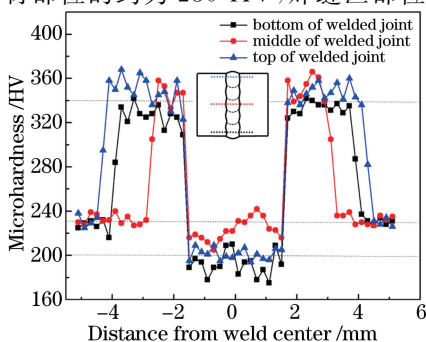


图 7 焊接接头不同位置的显微硬度分布

Fig. 7 Microhardness distributions of weld joint at different locations

织主要为板条马氏体和焊接过程产生的大量脆硬相,具有最高的硬度;母材部位的组织主要为回火马氏体和少量残余奥氏体,硬度也较高;而焊缝部位的组织主要为奥氏体组织及少量析出相,硬度最低。

由图 7 可知,接头焊缝区域中部的平均硬度为 223 HV,明显高于顶部的 201 HV 和底部的 192 HV;在热影响区,接头中部平均硬度为 351 HV,与顶部的 347 HV 相当,略高于底部的 330 HV;在母材中不同位置的硬度值均在 230 HV 左右。焊缝中部打点位置位于上层焊道在下层焊道的重熔部分,二次凝固引起组织硬化,导致局部硬度增加;而底部打点位置位于上层焊道在下层焊道的回火作用区,组织得到细化,因而硬度值相对较低。

虽然热影响区部分硬度值较高,但是焊缝区域主要为奥氏体组织,具有塑性和应力松弛作用,因此接头热影响区不易产生裂纹。相较于传统的弧焊工艺,超空间隙激光焊接的热影响区要窄很多,对接头整体性能的影响相对要小。

焊接接头不同位置的拉伸性能测试结果如表 3 所示。试样均断于焊缝,接头抗拉强度略低于母材的,断裂方式为明显的塑性断裂。

表 3 拉伸试验结果

Table 3 Results of tensile test

Sampling location	Yield strength /MPa	Tensile strength /MPa	Fracture position
Bottom of joint	532	698	Weld zone
Middle of joint	456	665	Weld zone
Top of joint	416	674	Weld zone

3.3.2 -196 °C 夏比冲击性能及断口形貌

接头不同位置的冲击试验结果如图 8 所示。每组试验均测试三个试样后取平均值。其中,V 型缺口位于焊缝和热影响区的 4 组试样均完全断裂,V 型缺口位于母材区的 2 组试样韧性较好,未完全断裂。

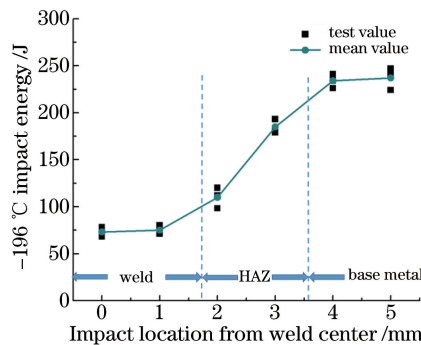


图 8 焊接接头不同位置的-196 °C 夏比冲击功

Fig. 8 Charpy impact energy of welded joint at -196 °C at different positions

由图 8 可知,低温冲击功从焊缝中心经热影响区至母材依次递增,焊缝中心和+1 mm 处的低温冲击功平均值分别为 73 J 和 75 J,均超过标准 BS 7777 规定的 35 J 的一倍。+2 mm 处的 V 型缺口靠近熔合线,该组试样冲击韧性较低,一方面是因为该部分属于热影响区过热区,组织为粗大的板条马氏体,韧性较低;另一方面,该区在焊接过程中温度较高,组织中原有的奥氏体在快速冷却条件下几乎全部转变为马氏体,因此残余奥氏体的含量非常低,极大地降低了低温韧性。+3 mm 处的缺口位于热影响区细晶区附近,晶粒较细小,因此低温韧性相比+2 mm 处有显著提高。+4 mm 和+5 mm 处的 V 型缺口均位于母材区,低温冲击功均达到 230 J 以上,和母材出厂测试结果保持一致,这主要归功于母材中碳含量较低且残余奥氏体含量较高,弥散分布的残余奥氏体在低温下仍可稳定存在,并具有良好的组织稳定性和明显的强韧化作用。

所有冲击试样断口均由纤维区、剪切唇两个区域组成,且断口形状不规则,属韧性断裂。选取焊缝中心和+2 mm 处的两个冲击试样断口在扫描电镜下进行观察,断口形貌如图 9 所示。由图可知,两个试样断口在低倍下均呈现不同程度的起伏,在高倍下均可观察到大量的韧窝。相比而言,距离焊缝中心+2 mm 处的断口起伏更大,韧窝数量更多,且韧窝尺寸相比焊缝中心的更小,故韧性相对较好,这与冲击试验结果保持一致。

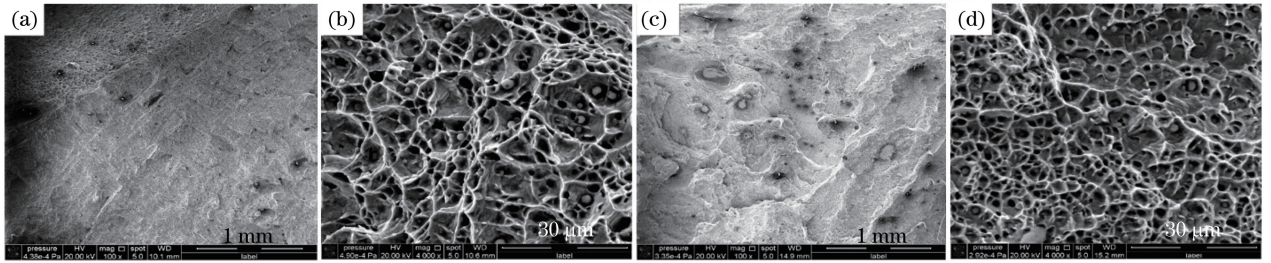


图9 接头不同位置的断口形貌。(a)焊缝中心(低倍);(b)焊缝中心(高倍);(c)离中心+2 mm处(低倍);
(d)离中心+2 mm处(高倍)

Fig. 9 Fracture morphology of welded joint at different positions. (a) Weld center (low magnification);
(b) weld center (high magnification); (c) position at +2 mm from weld center (low magnification);
(d) position at +2 mm from weld center (high magnification)

4 结 论

通过对厚度为 16 mm 的 9Ni 钢进行超窄间隙激光填丝焊试验,并对接头组织和力学性能进行分析测试,得到以下结论:

1) 采用优化的超窄间隙坡口和激光填丝焊接工艺,可以得到侧壁熔合良好的超窄间隙接头。与同等厚度的弧焊焊缝相比,超窄间隙激光焊接的焊缝截面积仅为其 1/4 左右,极大地减少了镍基合金焊丝的消耗,降低了焊材成本。

2) 焊缝组织主要为 γ 固溶体,两侧结晶形态为柱状枝晶,垂直于熔合线向焊缝中心生长,焊缝中心为等轴晶;热影响区粗晶区组织为粗大的板条马氏体,细晶区组织为马氏体及少量残余奥氏体。

3) 接头热影响区显微硬度明显高于母材的和焊缝的;接头抗拉强度略低于母材的;随着与焊缝中心距离的增大,接头的低温冲击功增大,焊缝中心的最低(73 J),远高于标准规定的用于 LNG 船液罐的 9Ni 钢焊缝的 -196 °C 冲击功(35 J)。焊缝和热影响区的冲击断口形貌均为韧窝状,属韧性断裂。

本试验结果对 9Ni 钢的先进焊接工艺的研究和生产应用具有参考价值。

参 考 文 献

- [1] Wu Y, Cai Y, Wang H, *et al.* Investigation on microstructure and properties of dissimilar joint between SA553 and SUS304 made by laser welding with filler wire[J]. *Materials & Design*, 2015, 87: 567-578.
- [2] Li Yingqing, Liu Shufeng, Xiao Feiyan. The 9% Ni steel and its weld on the LNG storage tank construction[J]. *China Chemical Industry Equipment*, 2014(1): 28-32.
李应钦, 刘树锋, 肖飞雁. 9%Ni 钢及其在 LNG 储罐建造中的焊接[J]. *中国化工装备*, 2014(1): 28-32.
- [3] Lin Wenhua, Hua Xueming, Cai Yan, *et al.* Study on welding qualifications of 9% nickel steel[J]. *Welding Technology*, 2016, 45(3): 43-46, 47.
林文虎, 华学明, 蔡艳, 等. 9Ni 钢焊接工艺适应性研究[J]. *焊接技术*, 2016, 45(3): 43-46, 47.
- [4] Yang Xisheng, Yu Jianming, Qian Linfeng, *et al.* Effect of welding method on low temperature toughness of 9Ni steel weld metal[J]. *Hot Working Technology*, 2016, 45(7): 30-32, 36.
杨喜胜, 于建明, 钱林峰, 等. 焊接方法对 9Ni 钢焊缝金属低温韧性的影响[J]. *热加工工艺*, 2016, 45(7): 30-32, 36.
- [5] Zhu Qingsong, Peng Yun, Qi Yanchang, *et al.* Low temperature toughness and welded joint of 1436LNG tanks with 9Ni steel[J]. *Hot Working Technology*, 2015, 44(21): 21-23, 27.
朱青松, 彭云, 齐彦昌, 等. 1436LNG 储罐用 9Ni 钢低温性能及焊接接头性能[J]. *热加工工艺*, 2015, 44(21): 21-23, 27.
- [6] Kang Lingfeng, Shi Shaojian, Wang Huan, *et al.* Effects of AC square wave parameters on weld formation and joint microstructure in 9% Nickel steel SAW[J]. *Hot Working Technology*, 2016, 45(15): 32-36, 40.
康凌风, 石少坚, 王欢, 等. 交流方波参数对 9Ni 钢埋弧焊焊缝成形和接头组织的影响[J]. *热加工工艺*, 2016,

45(15): 32-36, 40.

- [7] Kim S H, Kang C Y, Bang K S. Weld metal impact toughness of electron beam welded 9% Ni steel[J]. Journal of Materials Science, 2001, 36(5): 1197-1200.
- [8] Yu Y C, Yang S L, Yin Y, *et al.* Multi-pass laser welding of thick plate with filler wire by using a narrow gap joint configuration[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2013, 27(7): 2125-2131.
- [9] Zhang Guowei, Xiao Rongshi. Microstructure and mechanical properties of 5083 aluminum alloy joint of heavy section by ultra-narrow gap fiber laser beam welding[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0903006.
张国伟, 肖荣诗. 5083 铝合金厚板超窄间隙光纤激光焊接接头组织与性能[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0903006.
- [10] Zhao Yong, Wang Qingzhao, Huang Jian, *et al.* Microstructures and properties of ultra-narrow-gap multi-pass welded joint of 50 mm turbine rotor steel by laser welding with filler wire[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0203007.
赵 勇, 王清照, 黄 坚, 等. 50 mm 转子钢超窄间隙激光填丝焊接接头组织与性能[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0203007.
- [11] Zhang Guowei, Xiao Rongshi. Microstructure and mechanical property of 60 mm-thick 304 stainless steel joint by ultra-narrow gap fiber laser beam welding[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0803007.
张国伟, 肖荣诗. 60 mm 厚 304 不锈钢板超窄间隙光纤激光焊接接头组织性能研究[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0803007.